

高浓度活性污泥法对二沉池的要求探讨

周克钊

(中国市政工程西南设计研究总院, 成都 610081)

摘要 根据深圳市罗芳污水处理厂的中试结果, 探讨高浓度活性污泥法对二沉池的要求。按照澄清功能对污泥沉降速度进行分析, 以浓缩功能对活性污泥固体通量进行判断, 结果表明, 工程设计中应适当降低二沉池表面水力负荷和提高污泥回流比。同时, 根据不同的污泥沉降性能, 得出了具体的能够稳定维持系统高浓度活性污泥的设计参数。

关键词 高浓度活性污泥法 二沉池 表面水力负荷 污泥回流比 限制固体通量

Requirements of high concentration activated sludge process on secondary clarifier

Zhou Kezhao

(Southwest Municipal Engineering Design and Research Institute of China, Chengdu 610081, China)

Abstract: In this paper, based on the results of pilot test of Shenzhen Luofang Wastewater Treatment Plant, the requirements of high concentration activated sludge process on secondary clarifier was discussed. The impacts of sludge settling rate on clarifying effects and the impacts of activated sludge solid flux on condensing effects were analyzed. The results showed that decreasing secondary clarifier surface hydraulic load properly and improving sludge reflux ratio should be conducted in project design. Meanwhile, according to the different sludge settling characteristics, this study also got the detailed design parameters stabilize and maintain high concentration activated sludge in the system.

Keywords: High concentration activated sludge process; Secondary clarifier; Hydraulic surface load; Sludge reflux ratio; Limited solid flux

1 高浓度活性污泥法概述

高浓度活性污泥法(ZL 2008 1 0066 6572)是指活性污泥浓度高于 6 g/L 的活性污泥法处理工艺, 该浓度为《室外排水设计规范》(GB 50014—2006, 以下简称“规范”)中推荐的最高活性污泥浓度。

2007~2010 年在深圳市罗芳污水处理厂(以下简称“罗芳厂”)进行高浓度活性污泥法的大规模中试($300 \times 2 \text{ m}^3/\text{d}$), 该厂一期工程为 AB 法(其中 B 段为 A^2/O 法), 二期工程为 T 型氧化沟, 在不同的试验阶段, 中试进水来自一期工程的沉砂池或中间二沉池。“罗芳厂”中试结果表明, 高浓度活性污泥法可以获得极佳的脱氮除磷效果^[1~3]。

在进水(来自沉砂池)碳源充足($\text{COD}/\text{TN} =$

10.1)条件下, 同步硝化反硝化作用强烈, 当停留时间 8.33 h 、进水 $\text{TN } 47.98 \text{ mg/L}$ 时, 出水 $\text{TN } 6.21 \text{ mg/L}$, 远低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准($\text{TN } 15 \text{ mg/L}$)。在进水(来自中沉池)碳源不足($\text{COD}/\text{TN} = 4.58$)条件下, 当停留时间 6.46 h 、进水 $\text{TN } 39.91 \text{ mg/L}$ 时, 出水 $\text{TN } 11.29 \text{ mg/L}$, 仍低于一级 A 标准。不仅如此, 高浓度活性污泥法在良好除氮的同时, 还具有极佳的除磷效果, 当进水 TP 为 7.51 mg/L 时, 出水 TP 为 0.16 mg/L (不设化学强化除磷), 不到一级 A 标准($\text{TP } 0.5 \text{ mg/L}$)的 $1/3$ 。

众所周知, 随着污泥浓度的增加, 污泥沉降性能会迅速下降, “罗芳厂”中试却利用普通二沉池[表面

水力负荷 $1.26 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$], 稳定维持了高浓度活性污泥。那么, 普通二沉池为何能够稳定维持高浓度活性污泥? 高浓度活性污泥法对二沉池有无特殊要求? 这些问题, 均需要深入探讨, 为此, “罗芳厂”中试进行了大量静置沉淀试验。

2 试验内容

2.1 混合液

在“罗芳厂”中试长期的运行中发现, 进水 SS 越高, 污泥沉降性能越好。静置沉淀试验采用了三种不同沉降性能的污泥, 分别为: ①沉降性能好的污泥, 来自“罗芳厂”二期工程 1 号氧化沟的中沟, 进水 SS 很高, 为沉砂池出水; ②沉降性能中的污泥, 来自“罗芳厂”一期工程的 B 段曝气池, 进水 SS 较低, 为中沉池出水; ③沉降性能差的污泥, 来自“罗芳厂”中试装置的南系列, 进水 SS 很低, 为中沉池出水, 当时中沉池刚检修完毕, 去除 SS 的效果特别好, 而且当时好氧段的溶解氧控制得很低, 使污泥处于“微膨胀”状态。三种试验污泥的特性(“罗芳厂”化验室提供)见表 1。

表 1 三种试验污泥的特性

项目	MLSS		SVI	
	样本数/个	浓度/g/L	样本数/个	浓度/mL/g
沉降性能好的污泥	8	6.73~7.83(7.14)	8	24.42~29.74(27.48)
沉降性能中的污泥	3	2.71~8.14(5.00)	3	42.99~66.37(54.11)
沉降性能差的污泥	10	6.46~9.03(7.52)	10	96.56~139.72(120.84)

注: 括号内为平均值。

2.2 试验设备

沉淀柱采用当时最大的 2 L 量筒。开始采用的 10 只 2 L 量筒, 高度一致, 始末刻度(200~2 000 mL)的距离均为 291 mm。陆续破损后, 换用 10 只新的 2 L 量筒, 高度接近但不完全一致, 始末刻度的距离不等, 在 333~351 mm。

静置沉淀前采用微孔曝气搅拌。风机采用某公司生产的 ACO-006 电磁式空气泵, 风量 85 L/min, 功率 105 W。曝气头为刚玉小砂头, 直径和长度均为 35 mm。摄影设备采用普通电子相机。

2.3 试验方法

取混合液, 浓缩以提高其浓度, 或用上清液稀释以降低其浓度, 再进行多浓度静置沉淀试验。各沉淀柱利用微孔曝气搅拌混合, 然后停止曝气, 取出曝气头, 各沉淀柱同时开始沉淀, 不断拍下各沉淀柱的

沉降过程。

2.4 数据整理方法

事后根据沉淀过程的大量照片, 记录沉淀时间(拍照时已自动记录在照片的属性中, 精确到秒), 判读沉降界面高度(可以多次重复判读, 以减少判读误差), 结果见图 1(仅列出一例)。

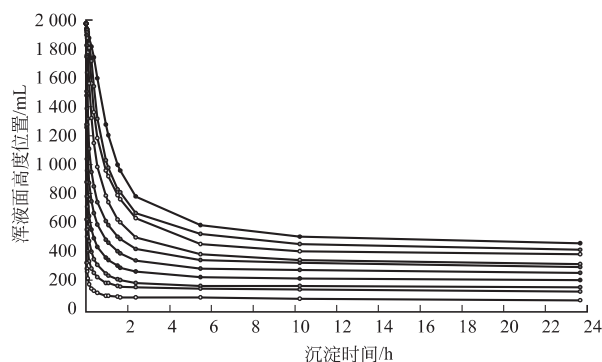


图 1 多浓度沉淀过程

为了减少判读误差的影响, 本文采用平均污泥沉速, 即按照从沉淀开始后发生的沉淀时间和界面下降高度计算。平均沉速比瞬时沉速(按照某一时间段内的界面下降高度计算)更稳定, 虽偏小, 但用于工程设计更安全。由于沉淀过程中沉速不断减小, 而且为了避免沉淀初期絮凝过程的影响, 本文采用沉淀过程中出现的最大平均沉速。

2.5 试验过程

2008 年 10 月 8~30 日, 针对沉降性能差的污泥, 进行了 10 次多浓度静置沉淀试验, 共获得 100 条静置沉降曲线, 从而获得 100 组浓度-沉速数据; 2009 年 6 月 10~26 日, 针对沉降性能中的污泥, 进行了 3 次多浓度静置沉淀试验, 共获得 124 条静置沉降曲线, 从而获得 124 组浓度-沉速数据; 2009 年 8 月 3~15 日, 针对沉降性能好的污泥, 进行了 8 次多浓度静置沉淀试验, 共获得 214 条静置沉降曲线, 从而获得 214 组浓度-沉速数据。静置沉淀试验历时近一年, 拍摄了 1 508 张沉降过程照片。

3 数据分析

众所周知, 二沉池可以划分为两个功能区: ①澄清区, 位于二沉池的上部, 整体以上升流速(上升流速=表面水力负荷)上升; ②浓缩区, 位于二沉池的下部, 整体以污泥回流引起的下降流速(若忽略排泥的影响, 下降流速=表面水力负荷×污泥回流比)下

降,同时污泥以沉淀速度下沉。

在这两个功能区中,二沉池具有两个基本功能:

①澄清功能,实现泥水分离,排出澄清的出水,要求二沉池的表面水力负荷必须低于混合液的污泥沉速;②浓缩功能,进行污泥浓缩,回流浓缩的污泥,要求二沉池的固体负荷必须低于限制固体通量。

3.1 沉速分析

三种不同沉降性能的污泥浓度和沉速的实测数据见图 2。

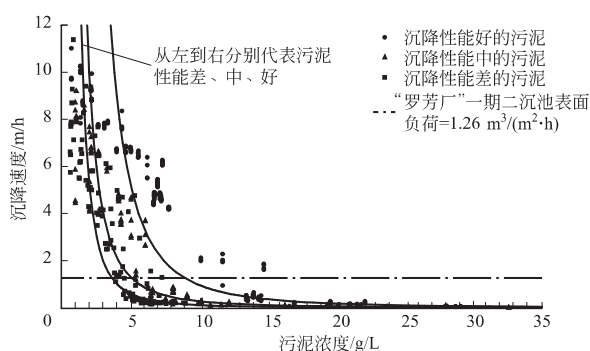


图 2 三种污泥的浓度和沉速

由图 2 可见,三种污泥的沉速均随浓度的增加而迅速下降,在同样的污泥浓度下,沉降性能好的污泥的沉速最大,沉降性能中的污泥沉速居中,沉降性能差的污泥的沉速最小。为了满足澄清功能,二沉池的表面水力负荷必须低于混合液的污泥沉速。为了更清楚地判断二沉池能够维持的混合液污泥浓度,将图 2 的局部放大,调换坐标(见图 3)。

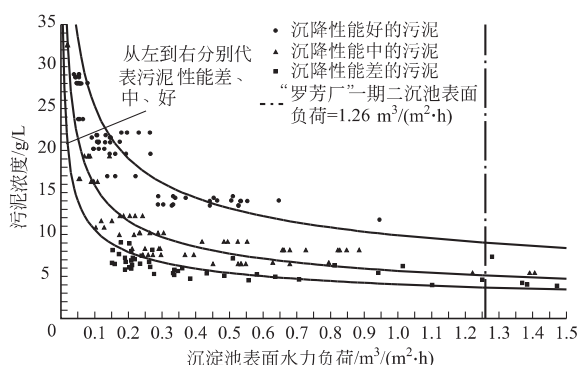


图 3 二沉池表面水力负荷与能够维持的系统污泥浓度

根据图 3 的趋势线,按澄清功能,可计算得二沉池表面水力负荷能够维持的系统污泥浓度(见表 2),以及污泥浓度要求的二沉池表面水力负荷(见表 3)。

表 2 二沉池表面水力负荷与能够维持的系统污泥浓度

表面水力负荷 / $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	沉降性能好的 污泥浓度/ g/L	沉降性能中的 污泥浓度/ g/L	沉降性能差的 污泥浓度/ g/L
0.3	16.16	9.7	6.69
0.6	12.18	7.12	5.02*
0.8	10.83	6.26	4.46*
1	9.89	5.67*	4.06*
1.26	9	5.12*	3.69*
1.5	8.38	4.73*	3.43*

注: * 表示不满足高浓度活性污泥法要求。

表 3 系统污泥浓度要求的二沉池表面水力负荷

能够维持的 系统污泥 浓度/ g/L	沉降性能好的 表面水力负荷 / $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	沉降性能中的 表面水力负荷 / $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	沉降性能差的 表面水力负荷 / $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
6	3.46	0.88	0.39
7	2.35	0.62	
8	1.69	0.46	
9	1.26	0.36	
10	0.97		
11	0.77		
12	0.62		
13	0.51		
14	0.43		
15	0.36		

由表 2 和表 3 可见,按澄清功能考虑,二沉池的表面水力负荷是能够维持的系统污泥浓度的决定性因素,表面水力负荷越低,则能够维持的系统污泥浓度越高。在“罗芳厂”一期工程 and “罗芳厂”中试二沉池的表面水力负荷 $1.26 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (为“规范”推荐的活性污泥法工艺中的二沉池表面水力负荷 $0.6 \sim 1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的较高水平) 条件下,只有沉降性能好的污泥能够维持 6 g/L 以上的系统污泥浓度,满足高浓度活性污泥法的要求,而沉降性能中和差的污泥均不行。如果将表面水力负荷降低到 $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (为“规范”推荐范围的较低水平),则沉降性能好和中的污泥,均可以满足高浓度活性污泥法的要求,而沉降性能差的污泥仍不行。如果将表面水力负荷进一步降低到 $0.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (低于“规范”推荐范围),则无论污泥沉降性能好坏,均可以满足高浓度活性污泥法的要求。

综上所述,适当降低二沉池表面水力负荷,有利于维持高浓度活性污泥。

3.2 固体通量分析

沉淀浓缩区中活性污泥的总固体通量由两部分组成,主要部分(由二沉池污泥回流引起的)是下降流速提供的输移通量(输移通量=污泥浓度×下降流速),其次是沉淀浓缩过程提供的沉淀通量(沉淀通量=污泥浓度×沉淀速度)。

沉降性能好的污泥的总固体通量的实测数据[表面水力负荷=1.26 m³/(m²·h),同“罗芳厂”一期工程 and “罗芳厂”中试的二沉池]见图4(沉降性能中和差的污泥的图与此类似,未列出)。

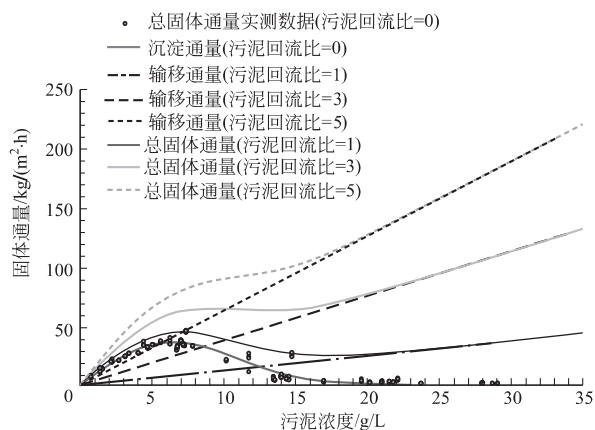


图4 沉降性能好的污泥的总固体通量

由图4可见,如果忽略极低浓度混合液的沉淀不会出现泥水界面的问题,则输移通量为从原点出发的一族射线(斜率为下降流速=表面水力负荷×

污泥回流比),沉淀通量为从原点出发的一条曲线,总固体通量为从原点出发的一族曲线,随污泥回流比的增大而逐渐抬升,使得极小点也被抬高,故限制固体通量增大。

值得注意的是,在表面水力负荷 1.26 m³/(m²·h)的条件下,当污泥回流比增加到3左右(为规范的回流比推荐范围0.2~4的较高水平)时,总固体通量曲线的极小点消失,意味着限制固体通量不再存在,即通过二沉池的固体通量不再存在限制。

按照图4(以及未列出的沉降性能中和差的总固体通量图)的趋势线,按浓缩功能,可以计算得到在不同二沉池表面水力负荷条件下二沉池能够维持的系统污泥浓度,见表4。

由表4可见,按浓缩功能考虑,二沉池的表面水力负荷依然是能够维持的系统活性污泥浓度的最重要因素,表面水力负荷越低,则能够维持的系统活性污泥浓度越高。二沉池的污泥回流比是能够维持系统活性污泥浓度的另一重要因素,污泥回流比越高,则能够维持的系统活性污泥浓度越高(总体而言,但在少数情况下能够维持的系统污泥浓度持平或反而略有下降)。

一旦污泥回流比超过一定限度[在表面水力负荷 1.26 m³/(m²·h)的条件下,沉降性能好、中、差的三种污泥需要的污泥回流比分别为3.61、2.45、2.85],则限制固体通量消失,即二沉池(按浓缩功能)对固体通量不再存在限制。

表4 二沉池能够维持的系统污泥浓度

污泥 回流比	沉降性能好的系统污泥浓度/g/L						沉降性能中的系统污泥浓度/g/L						沉降性能差的系统污泥浓度/g/L					
	0.3 ^a	0.6 ^a	0.8 ^a	1.0 ^a	1.26 ^a	1.5 ^a	0.3 ^a	0.6 ^a	0.8 ^a	1.0 ^a	1.26 ^a	1.5 ^a	0.3 ^a	0.6 ^a	0.8 ^a	1.0 ^a	1.26 ^a	1.5 ^a
1	13.19	11.06	10.49	10.11	9.77	9.53	6.23	5.94*	5.82*	5.73*	5.61*	5.52*	7.63	5.59*	5.05*	4.71*	4.42*	4.23*
2	14.75	13.11	12.59	12.21	11.82	11.52	7.92	7.52	7.31	7.11	6.85	6.59	7.45	5.97*	5.54*	5.26*	4.98*	4.78*
3	15.42	13.94	13.40	12.96	12.46	12.00	8.66	8.11	7.77	7.41	不限	不限	7.29	6.06	5.67*	5.38*	不限	不限
4	15.74	14.29	13.68	13.14	不限	不限	9.02	8.29	不限	不限			7.16	6.05	5.64*	不限		
5	15.88	14.40	13.69	不限			9.20	8.24					7.04	5.97*	不限			
6	15.93	14.37	不限				9.26	不限					6.93	不限				
7	15.92	14.23					9.26						6.82					
8	15.88	不限					9.21						6.72					
9	15.80						9.12						6.62					
10	15.71						8.99						6.52					
11	15.60						不限						6.41					
12	15.47												不限					
13	15.33																	
14	15.18																	
15	15.00																	
16	不限																	

注: *表示不满足高浓度活性污泥法要求; a表示表面水力负荷,单位为 m³/(m²·h)。

在二沉池表面水力负荷 $1.26 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的条件下,若污泥回流比为 1,则只有沉降性能好的污泥能够维持超过 6 g/L 的高浓度活性污泥,而沉降性能中和差的污泥则不行。若污泥回流比增大到 2,则沉降性能好和中的污泥均能够维持高浓度活性污泥,只有沉降性能差的污泥不行。若污泥回流比增大到 3,三种污泥均能够维持高浓度活性污泥,但原因不同,沉降性能好的污泥是由于二沉池能够维持的系统污泥浓度高,而沉降性能中和差的污泥则是由于已经不再存在污泥浓度限制。

4 讨论

4.1 高浓度活性污泥法对二沉池的要求

结合表 2~表 4 分析结果,综合考虑澄清功能和浓缩功能,为了维持系统高浓度活性污泥,二沉池需要满足:①适当降低表面水力负荷和提高污泥回流比,污泥沉降性能越差,则表面水力负荷应该越低,污泥回流比应该越高;②三种沉降性能不同的污泥,能够稳定维持 6 g/L 以上的系统高浓度活性污泥的表面水力负荷和污泥回流比,见图 5,并归纳于表 5。

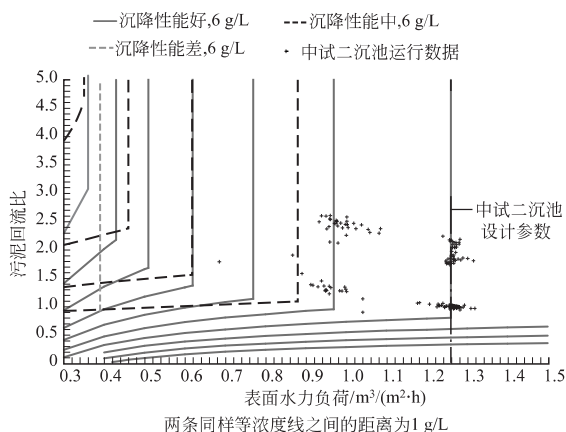


图 5 能够稳定维持高浓度活性污泥的表面水力负荷和污泥回流比

表 5 能够稳定维持系统高浓度活性污泥的表面水力负荷和污泥回流比

污泥 回流比	表面水力负荷/ $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$					
	0.3	0.6	0.8	1	1.26	1.5
1	好、中、差	好	好*	好*	好*	好
2	好、中、差△	好、中△	好、中*△	好*	好*	好
3	好、中、差△	好、中△	好、中*△	好*	好*	好
4	好、中、差	好、中	好、中	好	好	好
5	好、中、差	好、中	好、中	好	好	好

注:好、中、差分别表示污泥沉降性能好、中、差,△表示推荐参数,*表示罗芳中试参数。

由图 5 和表 5 可见,污泥沉降性能是稳定维持系统高浓度活性污泥的关键,无论污泥沉降性能好,均有可能维持系统高浓度活性污泥,但污泥沉降性能越好,则越容易维持:

(1) 沉降性能好的污泥,对表面水力负荷无要求 [$0.3 \sim 1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 均可],要求污泥回流比 ≥ 1 。

(2) 沉降性能中的污泥,要求表面水力负荷较低 [$0.3 \sim 0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$],表面水力负荷 $0.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时要求污泥回流比 ≥ 1 ,表面水力负荷 $0.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时要求污泥回流比 ≥ 2 。

(3) 沉降性能差的污泥,要求表面水力负荷很低(仅 $0.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$),要求污泥回流比 ≥ 1 。

从工程实际考虑,高浓度活性污泥法的二沉池的设计参数,可以考虑选用较低的表面水力负荷 [$0.3 \sim 0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] 和较高的污泥回流比(2~3),污泥沉降性适应范围广(好、中、差均可)。

4.2 “罗芳厂”中试能够维持高浓度活性污泥的原因

“罗芳厂”中试无意中发现了高浓度活性污泥法,当时并不清楚能够维持高浓度活性污泥的原因,事后反思,主要有以下三点:

(1) 为了脱氮而提高进水碳氮比,改用沉砂池出水(SS 很高)作为进水,无意中提高了污泥沉降性能,使得在澄清功能和浓缩功能上,二沉池能够维持系统高浓度活性污泥。

(2) 为了脱氮而提高总回流比,包括提高污泥回流比,无意中使得在浓缩功能上,二沉池能够维持系统高浓度活性污泥。

(3) 在延长水力停留时间的试验阶段,进水流量降低,无意中降低了二沉池的表面水力负荷,同时提高了污泥回流比,使得在澄清功能和浓缩功能上,二沉池均能够维持系统高浓度活性污泥。

“罗芳厂”中试主要的高浓度活性污泥试验阶段的二沉池运行实际参数见表 6。

自 Coe 和 Clevenger(1916)首次提出固体通量概念和计算限制固体通量的方法以来^[4,5],所有的限制固体通量研究,大都集中在限制固体通量本身,难以投入实际应用。本文首次明确了高浓度活性污泥法对二沉池的要求(适当降低二沉池表面水力负荷和提高污泥回流比),可用于指导二沉池的设计和运行,有利于高浓度活性污泥法的广泛应用。

表6 “罗芳厂”中试主要高浓度活性污泥试验阶段的二沉池实际运行参数

中试阶段	二沉池高浓度活性污泥 1		二沉池高浓度活性污泥 2	后续第二阶段		
系列	北	南	南	南前	南后	北
样本数/个	39	14	26	66	66	49
表面水力负荷最小值/ $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	0.87	0.91	1.21	1.18	1.18	1.23
表面水力负荷最大值/ $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	1.09	1.04	1.32	1.32	1.32	1.29
表面水力负荷平均值/ $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	0.98	0.97	1.26	1.26	1.26	1.27
样本数/个	39	14	26	16	50	49
污泥回流比最小值	1.28	0.90	1.74	2.04	0.97	0.94
污泥回流比最大值	2.61	1.58	1.92	2.24	1.98	1.06
污泥回流比平均值	2.26	1.29	1.82	2.12	1.04	1.00
样本数/个	29	10	20	12	37	36
MLSS 最小值/g/L	4.94	5.51	7.24	5.56	6.52	7.28
MLSS 最大值/g/L	10.74	8.73	11.85	8.56	10.02	10.82
MLSS 平均值/g/L	8.78	7.47	9.51	6.73	8.18	8.65
样本数/个	29	12	20	49	49	36
SVI 最小值/mL/g	78	88	69	74	74	68
SVI 最大值/mL/g	155	107	89	144	144	102
SVI 平均值/mL/g	92	99	77	97	97	81

表7 实现高浓度活性污泥法的途径

实现途径	原理	优点	缺点
MBR	MBR 不采用二沉池,故不存在对活性污泥浓度的限制	稳定维持高泥	膜组件价高,易损坏,能耗较高(要求风量较大),从而成本较高
泥砂	模仿“罗芳厂”的进水条件(SS 很高),人工添加泥砂,提高污泥沉降性能	稳定维持高泥、简便易行、成本低	泥砂容易在系统内沉积,象“罗芳厂”一样,但该厂的运行实践表明,仅需每年清砂一次,并不影响运行和处理效果
磁粉	人工添加磁粉,提高污泥沉降性能	稳定维持高泥	磁粉与活性污泥结合不佳,需要絮凝剂,提高了药剂成本
SBR	按照本文结论,SBR 适当延长沉淀时间,相当于降低了表面水力负荷,而且无污泥回流,不存在固体通量限制	稳定维持高泥、简便易行、成本低	占用了一些生化时间,但生化时间一般较长,影响不明显
低表面负荷高污泥回流比二沉池	按照本文结论,降低二沉池表面水力负荷,提高污泥回流比	稳定维持高泥、简便易行、成本低	需要的二沉池体积较大,但可以利用双层或多层二沉池解决

4.3 实现高浓度活性污泥法的途径

“罗芳厂”中试结果表明,高浓度活性污泥法可以显著提高污水处理效果,具有较大的推广应用价值。

实现高浓度活性污泥法的途径较多,如表 7 所示。

由表 7 可见,实现高浓度活性污泥法的途径有: MBR 高浓度活性污泥法、泥砂高浓度活性污泥法(ZL 2010 1 0115 198X)、磁粉高浓度活性污泥法(ZL 2010 1 0543 4085)、SBR 高浓度活性污泥法(ZL 2011 1 0002 1860)和低表面负荷高污泥回流比二沉池高浓度活性污泥法,均能够稳定维持高浓度活性污泥,各有优缺点。其中,按照本文结论的 SBR 高浓度活性污泥法和低表面负荷高污泥回流比二沉池高浓度活性污泥法,简便易行,成本低,无重大缺点,具有广泛的应用前景。

参考文献

- 周克钊,段余杰,邹甘霖,等. Highsludge® 高浓度活性污泥脱氮工艺中试. 中国给水排水, 2009, 25(3): 1~6
- 周克钊,段余杰,甘霖,等. 碳源不足的 Highsludge® 高浓度活性污泥法研究. 给水排水, 2009, 35(3): 41~45
- 周克钊. 城市污水高浓度活性污泥法的后续试验研究. 中国给水排水, 2010, 26(15): 82~85
- 凯纳兹 T M. 水的物理化学处理. 李维音译. 北京: 清华大学出版社, 1982
- Stypka A. Factors influencing sludge settling parameters and solid flux in the activated sludge process; A literature review. Advanced wastewater treatment, Report No. 4, Stockholm, 1998

8. 通讯处: 610081 成都市星辉中路 11 号

E-mail: Zhoukezhao@126.com

收稿日期: 2012-11-16

修回日期: 2013-03-28